

ся в дорожній конструкції під дією імпульсного навантаження, є достатньо інформативними і можуть бути використані для неруйнівного аналізу параметрів шарів дорожньої конструкції.

1.Heisey, J.S., Stokoe II, K.H. & Meyer, A.H. 1982. Moduli of Pavement Systems from Spectral Analysis of Surface Waves. Transportation Research Record (TRB) No.852, 22-31.

2.Кунщиков Б.К., Кунщикова М.К. Общий курс геофизических методов разведки. – М.: Недра, 1976. – 492 с.

3.Новаковський Д.М., Кияшко І.В. Оцінка методів визначення параметрів дорожньої конструкції, які характеризують її несучу здатність // Вестник ХНАДУ: Сб. науч. тр. Вып.34-35. – Харьков: ХНАДУ, 2006. – С.74-78.

Отримано 16.03.2007

УДК 666.31

Е.В.КОНДРАЩЕНКО, д-р техн. наук, А.А.БАРАНОВА

Харьковская национальная академия городского хозяйства

А.Н.БАРАНОВ, д-р техн. наук

Украинская инженерно-педагогическая академия, г.Харьков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО

Приводится модель получения полуводного гипса α -модификации в конусообразном реакторе. Рассматриваются вопросы перераспределения температур с целью повышения однородности продукта обжига путем математического моделирования.

По обеспечению экономии материальных и энергетических ресурсов, а также жестких требований по экологии гипсовые материалы и изделия на их основе находятся в более предпочтительном положении по сравнению с другими строительными материалами. Это обусловлено простотой и экологичностью их производства. Из всех видов гипсовых вяжущих материалов наибольший интерес вызывает α -форма строительного гипса, так как он при достаточно высокой прочности относится к низкотемпературным и наименее энергозатратным видам вяжущих.

Получение α -полугидрата при обжиге гипса в потоке газообразного теплоносителя возможно за счет создания необходимого давления в обжиговом аппарате. Давление, при котором температура кипения воды будет выше температуры дегидратации двуводного гипса, создаст условия для образования α -полугидрата, так как при этом вода выделяется в капельножидком состоянии.

Установка диафрагм, вентилях и других аналогичных видов местных сопротивлений в аэродинамическом тракте обжигового аппарата приведет к образованию отложений пылевидного материала и поте-

ре работоспособности оборудования. Поэтому предлагается реактор обжигового аппарата выполнить в виде усеченного конуса.

Для интенсификации процесса обжига, улучшения качества продукта и экономии энергоносителей при производстве гипсового вяжущего α -формы нами разработана установка для обжига гипса в вихревом потоке газообразного теплоносителя с реактором-конусом и камерой томления, схема которой представлена на рис.1.

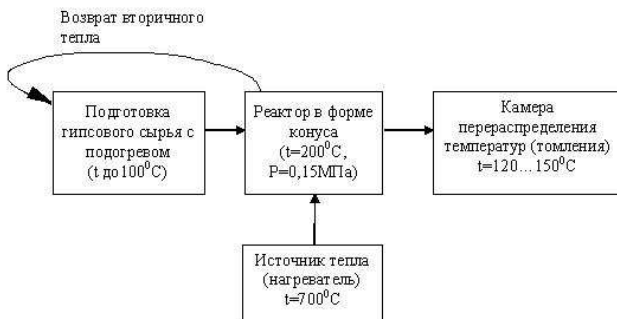


Рис.1 – Модель термической обработки с конусообразным реактором и камерой томления

Установка для обжига гипса работает по следующей схеме. Кусковое гипсовое сырье подается в сушильно-помольный агрегат со встроенным классификатором, где с помощью вторичного тепла высушивается, нагревается до температуры $85-95\text{ }^{\circ}\text{C}$ и измельчается до размера частиц $0,8-1\text{ мм}$. После подготовки в сушильно-помольном агрегате сырье подается к теплоносителю $t^0 \approx 250-400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выносится им под давлением $P \approx 0,15\text{ МПа}$ при температуре $t^0 \approx 200-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в реактор, имеющий форму конуса, где и происходит обжиг.

Высокотемпературные газы, которые выходят из нагревателя, подаются промышленным вентилятором под давлением. Из реактора материал выносится вихревым потоком в циклон-осадитель, откуда попадает в камеру томления. Вторичное тепло возвращается в сушильно-помольный агрегат.

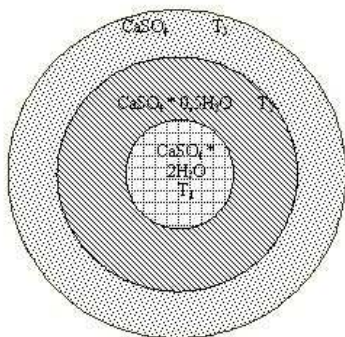
Разработанная установка принципиально отличается от существующих, в частности от установки фирмы «Бабкок – БШХ», в которой гипс обжигают горячими газами в цилиндрической трубе-сушилке [1]. Обжиг в реакторе цилиндрической формы приводит к неравномерному распределению тепла в сырье из-за большого различия скоростей движения теплоносителя по поперечному сечению. При попадании части-

цы на стенку трубы или разрушении вихря на ней материал «проваливается» на дно реактора, что приводит к получению многофазового материала, причем α -гипса практически не наблюдается.

Предложенный нами способ обжига гипса в реакторе в форме конуса лишен вышеуказанных недостатков и дает возможность повысить качество гипсового вяжущего. Конусообразная форма реактора позволяет обеспечить дегидратацию гипса при повышенном давлении (т.е. получить α -гипс) и предотвратить пережог материала. Это обусловлено тем, что при попадании частицы или разрушении вихря на стенке конуса, материал попадет в турбулентный поток, создаваемый вентилятором при подаче теплоносителя, и частицы, в зависимости от размера, попадают в различные температурные зоны. Мелкие частицы подхватываются потоком и выносятся из реактора, а не соскальзывают вдоль стенки, как это наблюдается в случае цилиндрической формы, поэтому не наблюдается их пережога. Средние – выносятся из реактора с более низкой скоростью, поэтому их пребывание в температурной зоне соответствует оптимальному режиму обжига. Наиболее длительной тепловой обработке подвергаются крупные частицы за счет малой скорости их движения, так как скорость теплоносителя в некоторых зонах не намного превышает скорость витания частиц.

Согласно теории, в теплообменном процессе тепло передается одновременно тремя видами передачи – конвекцией, теплопроводностью и тепловым излучением [2]. Специфика обжига гипса в вихревом потоке газообразного теплоносителя заключается в том, что нагревание частиц происходит практически без теплового излучения, так как температура газообразного теплоносителя находится в пределах 250-400°C и согласно закону Стефана - Больцмана в этом интервале температур лучеиспускательная способность материалов близка к нулю. В основном теплообмен происходит за счет конвективной теплоотдачи газообразного теплоносителя поверхности частиц обжигаемого материала и теплопроводности внутри частиц.

Теплопроводность частиц в общем случае обусловлена двумя механизмами: движением электронов проводимости (электронная теплопроводность) и тепловыми колебаниями атомов решетки (фононная теплопроводность). Для частиц гипса теплопроводность определяется вторым механизмом, так как свободных электронов в гипсе практически нет. При тепловой обработке двуводного гипса наблюдается неравномерное распределение температуры в каждой отдельно взятой частице сырья, так как теплоноситель всегда имеет более высокую температуру, чем температура образования полуводного гипса, что показано на рис.2



$$T_1 < T_2 < T_3$$

Рис. 2 – Модель частицы гипса после обжига

Это приводит к образованию многофазной структуры продукта обжига, т.е. на поверхности частицы радиусом r_0 образуется слой толщиной δ безводного гипса (ангидрита), затем слой полуводного гипса от $(r_0 - \delta)$ до r_1 , а в центре шаровидная зона двуводного гипса радиусом r_1 . Задачей же тепловой обработки гипсового сырья является создание условий образования полуводного гипса по всему объему частицы. Для этого молекулы воды, которые выделяются при дегидратации в результате диффузии из центральной зоны, должны попасть в наружный слой, чтобы в нем произошла реакция образования полуводного гипса. Это возможно в случае перераспределения температур в частице, для чего в технологической схеме предусмотрена камера томления. Размеры зон должны быть согласованы друг с другом, чтобы количество воды, выделяемой в центральной зоне, было необходимым и достаточным для образования полуводного гипса в наружном слое.

С этой целью была разработана математическая модель зависимости необходимого времени пребывания частиц в камере томления от температуры в ней и размеров частиц.

Математическая модель нагрева частицы гипса в реакторе была получена в результате решения уравнения теплопроводности путем использования метода Фурье, при условии, что частицы гипса имеют форму шара с радиусом r_0 , начальная их температура составляет T_0 и температура теплоносителя на поверхности частицы – T_1 [3]. Тогда распределение температуры в шаре $T(r, t)$ в момент времени t составляет:

$$T(r, t) = T_1 + 2 \frac{r_0}{\pi} (T_0 - T_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \cdot e^{-\left(\frac{n\pi a}{r_0}\right)^2 t} \cdot \frac{\sin \frac{n\pi r}{r_0}}{r}. \quad (1)$$

Здесь a^2 – коэффициент температуропроводности: $a^2 = \lambda / c \cdot \rho$, где λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость гипса; ρ – плотность гипса.

Необходимо учитывать, что для каждой модификации гипса (ангидрита, полуводного и двуводного гипса) существуют различные значения удельной теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности, причем вышеуказанные характеристики зависят еще и от температуры. Поэтому моделирование осуществляли послойно, причем результаты расчета для i -го слоя использовали в постановке краевой задачи для следующего $(i+1)$ -го слоя.

Модель выравнивания температурного поля в частице гипса при ее пребывании в камере томления строилась как суперпозиция трех задач.

Первая задача – продолжающийся нагрев и дегидратация шаровидной зоны в центре частицы для двуводного гипса (с переходом его в полуводный) радиусом r_1 . Эта задача решается аналогично решению задаче нагрева в реакторе, только при других краевых и начальных условиях.

Вторая задача – остывание наружного слоя безводного гипса (ангидрита) и насыщения его молекулами воды с образованием полуводного гипса.

Третья задача – остывание слоя полуводного гипса.

Вторая и третья задачи решаются на базе краевой задачи в сферических координатах об остывании шара радиуса r_0 , на поверхности которого поддерживается заданная температура.

Начальная температура шара равна:

$$u|_{t=0} = f(r, \theta, \varphi), \quad 0 \leq r < r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Решение краевой задачи в общем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} \right); \quad (2)$$

$$\left[\frac{\partial u}{\partial r} + hu \right]_{r=r_0} = t_0, \quad u|_{t=0} = f(r, \theta, \varphi)$$

является

$$u(r, \theta, \varphi, t) = \sum_{m,n=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^n e^{-\left(\frac{a\mu_m^{(n)}}{r_0}\right)^2 t} \frac{J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m^{(n)} r}{r_0}\right)}{\sqrt{r}} P_{n,k}(\cos \theta) \{A_{m,n,k} \cos k\varphi + B_{m,n,k} \sin k\varphi\},$$

где $\mu_m^{(n)}$ – положительные корни уравнения

$$\begin{aligned} \mu_m^{(n)} J_{n+\frac{1}{2}}(\mu_m^{(n)}) + \left(r_0 h - \frac{1}{2}\right) J_{n+\frac{1}{2}}(\mu_m^{(n)}) &= 0, \\ A_{m,n,k} &= \frac{\int_0^{r_0} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f(r, \theta, \varphi) r^{\frac{3}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m^{(n)} r}{r_0}\right) \sin \theta P_{n,k}(\cos \theta) \cos k\varphi dr d\theta d\varphi}{\varepsilon_k \frac{\pi r_0^2 (n+k)!}{(2n+1)(n-k)!} \left[1 + \frac{(r_0 h + n)(r_0 h - n - 1)}{(\mu_m^{(n)})^2}\right] J_{n+\frac{1}{2}}^2(\mu_m^{(n)})}, \\ \varepsilon_k &= \begin{cases} 2 & \text{при } k=0 \\ 1 & \text{при } k \neq 0 \end{cases} \\ B_{m,n,k} &= \frac{\int_0^{r_0} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f(r, \theta, \varphi) r^{\frac{3}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m^{(n)} r}{r_0}\right) \sin \theta P_{n,k}(\cos \theta) \sin k\varphi dr d\theta d\varphi}{\frac{\pi r_0^2 (n+k)!}{(2n+1)(n-k)!} \left[1 + \frac{(r_0 h + n)(r_0 h - n - 1)}{(\mu_m^{(n)})^2}\right] J_{n+\frac{1}{2}}^2(\mu_m^{(n)})}, \end{aligned}$$

где $J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m^{(n)} r}{r_0}\right)$ – функции Бесселя; $P_{n,k}(\cos \theta)$ – присоединенные функции полиномов Лежандра.

Камера томления должна обеспечить выравнивание температурного поля в частицах, т.е. нахождение частицы заданное время при соответствующих температурных режимах. Необходимо обеспечить равномерное движение материала в камере томления, для чего требуется исключить воронкообразование.

Математические модели (1)-(2) позволяют найти оптимальные значения факторов для соответствующих критериев оптимальности и определить необходимые конструктивные параметры оборудования при заданной производительности установки.

Итак, для получения качественного продукта в виде гипса α -формы необходимо проводить процесс обжига так, чтобы частички гипса по всему объему состояли из молекул $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Дальнейшее развитие и совершенствование технологии производства гипсовых вяжущих должно быть неразрывно связано с интенсификацией в пер-

вую очередь тепловых процессов и обновлением теплотехнического оборудования, работающего на новых научно обоснованных режимах обжига.

1. Ферронская А.В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). – М., 2004. – 485 с.

2. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

3. Кондращенко Е.В., Баранов А.Н., Бабушкин В.И. Математическая модель обжига гипса в турбулентном потоке газообразного теплоносителя // 36. наук. праць ВАН «УкрНДІвогнетривів ім. А.С.Бережного». Вип.102. – Харків, 2002. – С.110-115.

Получено 09.04.2007

УДК 624.046 : 691.327 : 666.973.6

И.М.ПОСТЕРНАК, С.А.ПОСТЕРНАК, кандидаты техн. наук,
А.А.ПОСТЕРНАК

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

НЕАВТОКЛАВНЫЙ ПЕНОБЕТОН – ЭФФЕКТИВНЫЙ СТЕНОВОЙ МАТЕРИАЛ

Выполнен обзор целесообразности изготовления и применения конструкционно-теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона в изделиях и конструкциях. Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния наполнителя и армирования на прочность и несущую способность стеновых элементов из КТ НПБ.

Энергетический кризис и рост стоимости отопления жилья в Украине (исследования по проблеме «Глобальная стратегия энергосбережения для Украины», которые были проведены рядом иностранных фирм по программе TACIS) внесли в наши устоявшиеся оценки зданий и строительных материалов существенные изменения. Произошла «техническая девальвация» традиционных видов изделий для наружных стен жилых домов – легкобетонных панелей и кирпича [1]. Их применение в однослойных наружных стенах стало недостаточно рационально и вследствие введения еще в 1996 г. новых нормативов по сопротивлению теплопередаче наружных ограждений. Для того, чтобы решить эту проблему, требуется время и новые материалы. Одним из таких материалов является неавтоклавный пенобетон (НПБ). Его применение в качестве материала для стеновых элементов позволяет значительно снизить энергопотребление, в тоже время он обладает отличными характеристиками, не имеющими сегодня альтернативы. Этот материал имеет высокие теплозащитные свойства и теплоаккумулирующую способность, он в силах значительно ограничить потери тепла и избежать проникновения слишком высоких температур в помещение, а также способствует регулированию влажности воздуха – впитывает и отдает влагу. Кроме того, ячеистый бетон является абсолют-